

高性能混凝土用无机非金属材料掺合料制备及应用效果分析

胡克涛

中建西部建设集团第四(广东)有限公司 广东 广州 510000

摘要: 高性能混凝土对矿物掺合料的技术需求日益提高。本文系统介绍了无机非金属材料掺合料的分类与特性,阐述了粉磨、分级复配及活化处理等制备工艺,分析了掺合料对混凝土工作性能、力学性能、耐久性能及微观结构的影响规律,对比了单掺、二元复合及三元复合体系的应用效果。研究表明,合理选择掺合料种类与掺量可显著提升混凝土综合性能,复合掺合料具有明显的协同效应,为高性能混凝土的绿色制备提供技术参考。

关键词: 高性能混凝土;无机非金属材料掺合料;制备工艺;复合掺合料;协同效应

引言:高性能混凝土广泛应用于高层建筑、桥梁隧道、海洋工程等领域,对强度、耐久性和工作性提出了更高要求。无机非金属材料掺合料如粉煤灰、矿渣粉、硅灰、石灰石粉等,因其填充效应、火山灰效应和微集料效应,成为配制高性能混凝土的重要组分。合理利用矿物掺合料不仅可改善混凝土性能,还能消纳工业废弃物,具有显著的经济效益和环境效益。本文从掺合料的分类特性出发,系统介绍制备工艺、性能影响及应用效果,为工程实践提供参考。

1 无机非金属材料掺合料的分类与特性

1.1 天然矿物掺合料

天然矿物掺合料取自自然界,本身带有火山灰活性或潜在水硬性,经过破碎、粉磨等简单加工后即可使用。比较常见的有沸石粉、硅藻土、石灰石粉和天然火山灰等。沸石粉内部结构特殊,比表面积大,活性较高,能改善混凝土的孔结构。硅藻土含无定形二氧化硅,火山灰活性明显,但吸水量大,掺多了混凝土容易变稠。石灰石粉主要是碳酸钙,活性不高,但颗粒细,能起到填充作用。天然火山灰分布广,粉磨后活性提高,可以替代部分水泥。这类材料资源丰富、价格低,缺点是不同地方的矿源活性差别大,用之前必须做活性检验。

1.2 工业副产矿物掺合料

工业副产矿物掺合料就是工业固体废渣,经过加工处理后变成混凝土的功能性组分,既提高了混凝土性能,又实现了废物利用。粉煤灰是电厂烧煤排出来的细粉末,分低钙和高钙两种。低钙粉煤灰能改善混凝土和易性、降低水化热,高钙粉煤灰自带水硬性,早期强度发展快。粒化高炉矿渣粉是炼铁产生的矿渣经水淬急冷后再粉磨得到的,有潜在水硬性,细度越高活性越好,是高强混

凝土的常用材料。硅灰是生产硅铁合金时收集的烟尘,颗粒极细,比表面积大,火山灰活性很高,能明显提高混凝土的强度和密实度^[1]。

1.3 复合矿物掺合料

复合矿物掺合料就是把两种或多种单一掺合料按一定比例混在一起,利用它们各自的优点互相弥补,让混凝土的综合性能更好。设计时主要考虑三点:一是活性要互补,比如硅灰和粉煤灰搭配,早期强度有硅灰顶着,后期强度靠粉煤灰往上拉;二是粒度要匹配,不同粒径的颗粒混在一起填充得更密实;三是性能要协同,比如矿渣粉和粉煤灰混用,抗侵蚀能力比单用任何一种都好。常见的组合有粉煤灰加矿渣粉、粉煤灰加硅灰等。复合掺合料最怕混合不均匀,必须用机械搅拌等方式保证各组分分布均匀。

2 无机非金属材料掺合料的制备工艺

2.1 粉磨工艺

粉磨是制备矿物掺合料的核心工序,目的就是要把物料磨细,增大比表面积,从而激发火山灰活性和填充效应。常用的粉磨设备有球磨机、立式辊磨机、振动磨和气流磨。球磨机结构简单、运行可靠,适合磨粉煤灰、矿渣这类中等硬度的物料,通过调整研磨体级配和填充率可以控制产品细度。立式辊磨机集粉磨和烘干于一体,比较省电,特别适合磨含水率高的矿渣。振动磨靠高频振动使研磨介质冲击物料,效率高,能磨出超细粉。气流磨用高速气流让物料颗粒互相碰撞而粉碎,能磨到微米甚至亚微米级,但耗电量大。粉磨时间短了细度不够,长了耗电增加还可能团聚,生产中要根据物料特性和目标细度来找合适的参数。

2.2 分级与复配工艺

分级和复配是保证矿物掺合料质量稳定、性能可调的重要工序。分级用气流分级机或离心式分级机,把粉磨后的物料按粒径大小分开,去掉粗颗粒,拿到特定细度区间的产品。分级精度直接影响到产品的粒度分布,进而影响填充效果和活性的发挥。复配是把不同种类、不同细度的掺合料按设计好的比例混合,可以用机械混合或气力混合^[2]。机械混合适合批量生产,气力混合均匀度高,适合连续生产线。复配时配比必须准,要用失重秤或螺旋秤自动配料。混好之后还要检验均匀性,保证每批货质量一样,满足高性能混凝土的配制要求。

2.3 活化处理技术

有些矿物掺合料活性不够,需要做活化处理,主要有机械活化、热活化和化学活化三种办法。机械活化就是超细粉磨,把颗粒磨细的同时破坏晶体结构,产生晶格缺陷,反应速度就上来了。超细粉煤灰的活性指数能提高20%以上。热活化适用于天然火山灰这类材料,在600~900℃煅烧,高岭石会变成偏高岭土,火山灰活性明显提升。化学活化是在粉磨或混合时加点激发剂,促进水化反应。复合活化就是把上面几种方法结合起来用,比如机械加化学联合活化,效果更好。活化处理要根据掺合料的种类和目标活性水平选合适的工艺,别盲目追求高活性把能耗搞上去了。

2.4 质量控制指标

矿物掺合料的质量控制是保证高性能混凝土性能稳定的前提,需要建立一套涵盖物理性能、化学活性和安全性的检测指标体系。细度是最核心的指标之一,通常用45 μm 筛余率或比表面积来表征,粉煤灰和矿渣粉都有相应的标准要求。活性指数用来衡量火山灰活性,好的矿渣粉28d活性指数能达到S105级。需水量比反映掺合料对混凝土工作性的影响,粉煤灰有明确的限值要求。流动度比适用于矿渣粉的评价。烧失量要控制住,烧失量高了说明未燃炭多,会影响减水剂的吸附效果。三氧化硫含量也要严格控制,一般不超过3.0%,否则容易和水泥中的铝酸盐反应生成延迟性钙矾石,引起体积膨胀。另外放射性检测是必须做的安全指标。建立从原材料进厂到成品出厂的全过程质量追溯体系,才能保证产品质量稳定。

3 矿物掺合料对高性能混凝土性能的影响

3.1 对新拌混凝土工作性能的影响

粉煤灰球形颗粒的“滚珠效应”可改善混凝土流动性。如表1所示,球形颗粒含量高的I级粉煤灰需水量比低至92%,而III级粉煤灰高达105%以上,两者对扩展度的影响相差约80mm。矿渣粉需水量略高但可增加浆体粘聚性,硅灰需水量大需配合减水剂使用。

表1 不同等级粉煤灰对工作性能的影响

粉煤灰等级	球形颗粒含量(%)	需水量比(%)	混凝土扩展度(mm)
I级	72	92	580
II级	58	98	550
III级	42	105	500

3.2 对力学性能的影响

不同掺合料对强度的贡献差异显著。表2显示,I级粉煤灰后期增长明显,28d强度达基准的106%;矿渣粉20%

掺量时28d强度达基准的110%;硅灰8%掺量时28d强度提高26%。复合使用效果更优。

表2 不同掺合料体系对28d抗压强度的影响

掺合料体系	掺量(%)	28d强度(MPa)	28d强度比(%)
基准(无掺合料)	0	52.6	100
I级粉煤灰	25	55.8	106
矿渣粉	20	57.9	110
硅灰	8	66.5	126
粉煤灰+矿渣粉	15+15	57.9	110

3.3 对耐久性能的影响

矿物掺合料可显著提升混凝土耐久性能。如表3所示,在抗氯离子渗透方面,单掺30%粉煤灰可使56d氯离子扩散系数降至基准的51%,单掺30%矿渣粉降至38%,三元复合体系降至基准的17%。在抗硫酸盐侵蚀方面,基准混

凝土浸泡180d后强度损失率达18.5%,表面剥落开裂;单掺30%矿渣粉后降至7.2%,表面基本完好;三元复合体系仅3.8%,外观完好。掺合料通过降低Ca(OH)₂含量、细化孔结构,有效抑制有害介质侵入。

表3 不同掺合料体系对耐久性能的影响

掺合料体系	56d氯离子扩散系数($\times 10^{-12}m^2/s$)	抗硫酸盐强度损失率(%)
基准	7.2	18.5
单掺30%粉煤灰	3.7	11.0
单掺30%矿渣粉	2.7	7.2
三元复合(F20+S15+SF5)	1.2	3.8

3.4 对微观结构的影响

掺合料对混凝土微观结构的改善是宏观性能提升的根本原因。基准混凝土中存在大量片状Ca(OH)₂晶体(5-10 μ m)和连通毛细孔(100-500nm)。单掺粉煤灰后,球形颗粒被水化产物包裹,Ca(OH)₂减少,毛细孔降至50-200nm。单掺矿渣粉后,Ca(OH)₂基本消失,C-S-H凝胶填充孔隙,毛细孔降至30-100nm且多为封闭孔。三元复合体系中,硅灰超细颗粒填充微孔,毛细孔降至10nm以下,界面过渡区消失,结构极其致密。微观结构的逐级优化解释了复合掺合料混凝土高性能的内在原因^[3]。

4 典型无机非金属矿物掺合料的应用效果对比

4.1 单掺体系性能对比

单掺体系只使用一种掺合料替代部分水泥,不同掺合料特点各异。粉煤灰可改善流动性、降低水化热,早期强度偏低但后期增长良好,适用于大体积混凝土。矿渣粉粘聚性好,后期强度可超过基准混凝土,抗侵蚀性能优良,适用于海工混凝土。硅灰需水量大、粘性高,需配合减水剂,早期强度显著提高,适用于超高强混凝土。石灰石粉可改善工作性,但后期强度增长有限,适用于中低强度混凝土。综合比较,粉煤灰和矿渣粉应用最广泛,硅灰适用于高强场景。

4.2 二元复合体系性能对比

二元复合体系利用两种掺合料的协同效应弥补单一材料不足。粉煤灰-矿渣粉复合体系中,前者改善工作性、降低水化热,后者提高后期强度和耐久性,28d强度比单掺粉煤灰高10%-15%,氯离子扩散系数降低30%以上。粉煤灰-硅灰复合体系用于C80以上超高强混凝土,硅灰提早期强度,粉煤灰调节粘性、降低成本。矿渣粉-硅灰复合体系兼具良好工作性和高活性,适用于高耐久性工程。设计时需根据工程要求通过试验确定最佳配比。

4.3 三元复合体系性能优化

三元复合体系引入第三种掺合料,进一步优化颗粒级配和活性匹配。粉煤灰-矿渣粉-硅灰三元体系效果最佳,三种材料粒径呈梯度分布(硅灰0.1-0.5 μ m、矿渣粉5-15 μ m、

粉煤灰10-30 μ m),复合后可形成紧密堆积,最大程度降低孔隙率。活性方面,硅灰提供早期强度,矿渣粉贡献中期强度,粉煤灰保证后期增长,实现全龄期强度发展。该体系28d强度可达100-120MPa,氯离子扩散系数降至 $1.0 \times 10^{-12}m^2/s$ 以下。总掺合料用量宜控制在30%-50%。

4.4 经济性与环境效益分析

矿物掺合料具有显著的经济与环境效益。经济上,工业副产掺合料价格远低于水泥,粉煤灰、矿渣粉仅为水泥价格的30%-60%。以C30混凝土为例,掺30%粉煤灰每立方米成本降低15-25元。环境上,每利用1吨矿物掺合料可减少1吨水泥生产,相应减排二氧化碳约0.8吨,节约不可再生资源约1.3吨。以年产100万吨掺合料计,每年可减少碳排放约80万吨。此外,掺合料混凝土耐久性提高,可延长结构寿命,具有全生命周期环境效益^[4]。

结束语

无机非金属矿物掺合料是高性能混凝土的重要组成部分,对提升混凝土性能、降低资源消耗具有重要意义。粉煤灰、矿渣粉、硅灰等工业副产掺合料活性高、性能稳定,是应用最广泛的品种;复合掺合料通过协同效应可显著改善混凝土的工作性、力学性能和耐久性。粉磨、分级、活化等制备工艺是保证掺合料质量的关键,需建立完善的质量控制体系。单掺、二元复合和三元复合体系各有特点,应根据工程需求优化选择。矿物掺合料的推广应用具有显著的经济与环境效益,是绿色混凝土发展的重要方向。

参考文献

[1]范云岗.高性能混凝土的生产质量控制[J].建材与装饰,2025,21(16):37-39.
 [2]韩洪超,郭保林,王凯,等.矿物掺合料和养护方式对混凝土保护层耐久性能的影响研究[J].混凝土,2026(1):16-23.
 [3]亢颀,房强.大掺量矿物掺合料混凝土工作性能与早期强度研究[J].水泥,2026(4):142-144.
 [4]王青沙.矿物掺合料对超高性能混凝土性能影响试验研究[J].混凝土,2025(2):188-192.